

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ФОБОСА ДЛЯ ОТРАБОТКИ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПОСАДКИ НА ФОБОС

Б.С. Жуков¹, Б.С. Дунаев¹, С.Б. Жуков²

¹ Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

² Автономная некоммерческая организация — АНО «Космос-НТ», Москва

Разработан стенд для моделирования изображений поверхности Фобоса с высоким разрешением, которые будут получаться с помощью телевизионной системы навигации и наведения (ТСНН) в процессе посадки КА «Фобос-Грунт» на поверхность Фобоса. Стенд позволяет проводить стереосъемку шероховатых поверхностей, сходных по структуре с поверхностью Фобоса, с высот от 1 до 65 см со стереобазой от 0,1 мм до 10 см. Путем комбинирования высоты съемки и стереобазы возможно получение последовательности снимков со стереопараллаксом, соответствующим условиям съемки Фобоса как узкоугольной, так и широкоугольными камерами ТСНН при снижении КА от высоты 10 км до 10 м. Полученные серии стереоизображений используются для отработки бортового программно-алгоритмического обеспечения ТСНН в режиме «Посадка».

A laboratory installation has been developed for modeling high-resolution images of Phobos which would be obtained by the Television System for Navigation and Observation (TSNN) during landing of the Phobos-Grunt s/c onto the Phobos surface. Rough surfaces similar to the Phobos surface can be imaged from a height from 65 to 1 cm with a stereo-base from 0.1 mm to 10 cm simulating the stereo-parallax variation that will be realized in the narrow- and wide-angle TSNN cameras during the s/c descent from 10 km to 10 m. The stereo images are used to test the TSNN landing support algorithms and software.

1. Задачи моделирования

При посадке космического аппарата (КА) «Фобос-Грунт» на поверхность Фобоса с помощью телевизионной системы навигации и наблюдения (ТСНН) будут решаться задачи измерения высоты и компонент скорости КА, а также авто-

номного выбора места посадки [1]. ТСНН состоит из двух узкоугольных телевизионных камер (УТК) с фокусным расстоянием $F = 500$ мм и двух широкоугольных телевизионных камер (ШТК) с фокусным расстоянием $F = 18$ мм, причем по диаметру платформы посадочного модуля с базисом $B = 2$ м размещаются по одной камере УТК и ШТК, обеспечивая возможность проведения стереоизмерений [2].

Для моделирования стереоизображений поверхности Фобоса с высоким пространственным разрешением, которые используются для отработки программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) ТСНН в режиме «Посадка» [3], разработан специальный стенд моделирования (СМ), на котором возможна реализация:

- цифрового параллакса (т. е. относительного смещения одноименных точек на стереоизображениях, измеренного в числе пикселей), получаемого камерами УТК и ШТК во всем диапазоне высот, в котором будет проводиться съемка Фобоса при посадке КА на его поверхность;
- структуры поверхности, которую можно ожидать на Фобосе (кратеры, борозды, камни, реголит);
- отражательных характеристик поверхности, сходных с характеристиками материала поверхности Фобоса (темный реголит);
- условий освещения, которые будут реализовываться при посадке на Фобос.

Диапазон изменения стереопараллакса получаемых на СМ изображений должен соответствовать высотам съемки камерами ТСНН от 30 км до 10 м, причем приоритетным является интервал высот от 4 км до 300 м для УТК и от 300 до 10 м для ШТК [1].

Предусмотрено два способа использования модельных изображений [3]:

- непосредственный ввод изображений в память процессоров камер ТСНН на этапе предварительной отработки ПАО;
- формирование оптических изображений на экране имитаторов поверхности Фобоса (ИПФ) в составе стенда ТСНН для окончательной отработки всей системы.

2. Стенд моделирования

Стенд моделирования (СМ) включает (рис. 1):

- стол с кюветой, в которой можно моделировать шероховатые поверхности со структурой, характерной для поверхности Фобоса;
- консоль с установленной на ней цифровой камерой, которая может перемещаться как в вертикальном направлении для изменения высоты съемки H_m , так и в горизонтальном направлении с помощью микрометрического привода для прецизионной установки стереобазы B_m ;
- персональный компьютер, осуществляющий управление цифровой камерой и прием получаемых изображений.



Рис. 1. Стенд моделирования стереоизображений шероховатых поверхностей

Основные характеристики стенда моделирования

Камера	Canon PowerShot G9
Размер изображения	4000×3000 пикселей
Высота съемки H_m	1...83 см
Стереобаза B_m	0,05...100 мм

Чтобы избежать излишней детальности изображений, получаемых на СМ при съемке с малых высот, а также необходимости использования слишком малых значений стереобазы, моделирование изображений ТСНН проводилось путем трехкратного заглубления полученных на стенде изображений и выделения центрального фрагмента размером 1000×1000 пикселей.

Комбинирование высоты съемки и стереобазы позволяет получать последовательность снимков со стереопараллаксом, соответствующим условиям съемки Фобоса как УТК, так и ШТК на разных участках траектории спуска КА на поверхность Фобоса.

Поскольку в настоящее время не имеется изображений поверхности Фобоса с дециметровым и сантиметровым разрешением, которое будет достигнуто камерами ТСНН при посадке, структура поверхности моделировалась таким образом, чтобы она напоминала структуру лунной поверхности при указанном разрешении (рис. 2).

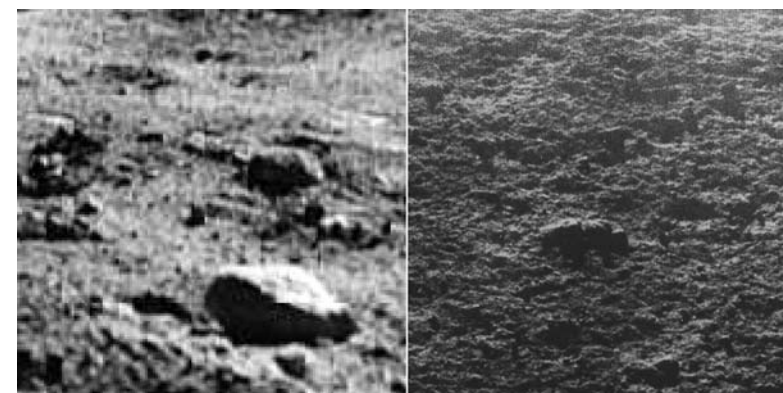


Рис. 2. Фрагменты изображений лунной поверхности, полученных с Лунохода

Примеры полученных на СМ стереоизображений, которые используются для моделирования снимков ТСНН поверхности Фобоса, показаны на рис. 3. При прямом вводе изображений в процессорную память камер ТСНН они соответствуют условиям съемки УТК с высот от 3 км до 300 м и ШТК — с высот от 200 до 20 м. На этих высотах разрешение камер ТСНН изменяется от десятков до единиц сантиметров. По своей структуре эти изображения напоминают снимки лунной поверхности, полученные с аналогичным разрешением (см. рис. 2).

3. Выбор параметров моделирования для прямого ввода изображений в процессорную память

При съемке на СМ со стереобазой B_m цифровой параллакс равен

$$\Delta n_m = \frac{B_m a_m}{h_m d_m k_m}, \quad (1)$$

где a_m — расстояние от задней главной точки объектива до плоскости изображения цифровой камеры (на больших расстояниях совпадающее с фокусным расстоянием объектива F_m); h_m — высота съемки от задней главной точки объектива до поверхности; d_m — размер элемента ПЗС-матрицы цифровой камеры; $k_m = 3$ — коэффициент закругления изображения.

Положение задней главной точки объектива цифровой камеры, от которой отсчитываются параметры a_m и h_m , точно не известно. Поэтому отношение $f_m = \frac{a_m}{h_m d_m}$, характеризующее масштаб изображения, получалось не расчетным путем, а было прокалибровано как функция высоты H_m , измеряемой от среднего уровня поверхности до переднего края объектива, путем съемки прецизионной тестовой миры. Вид функции $f_m(H_m)$ показан на рис. 4.

В результате соотношение (1) принимает вид

$$\frac{\Delta n_m}{B_m} = \frac{f_m(H_m)}{k_m}. \quad (2)$$

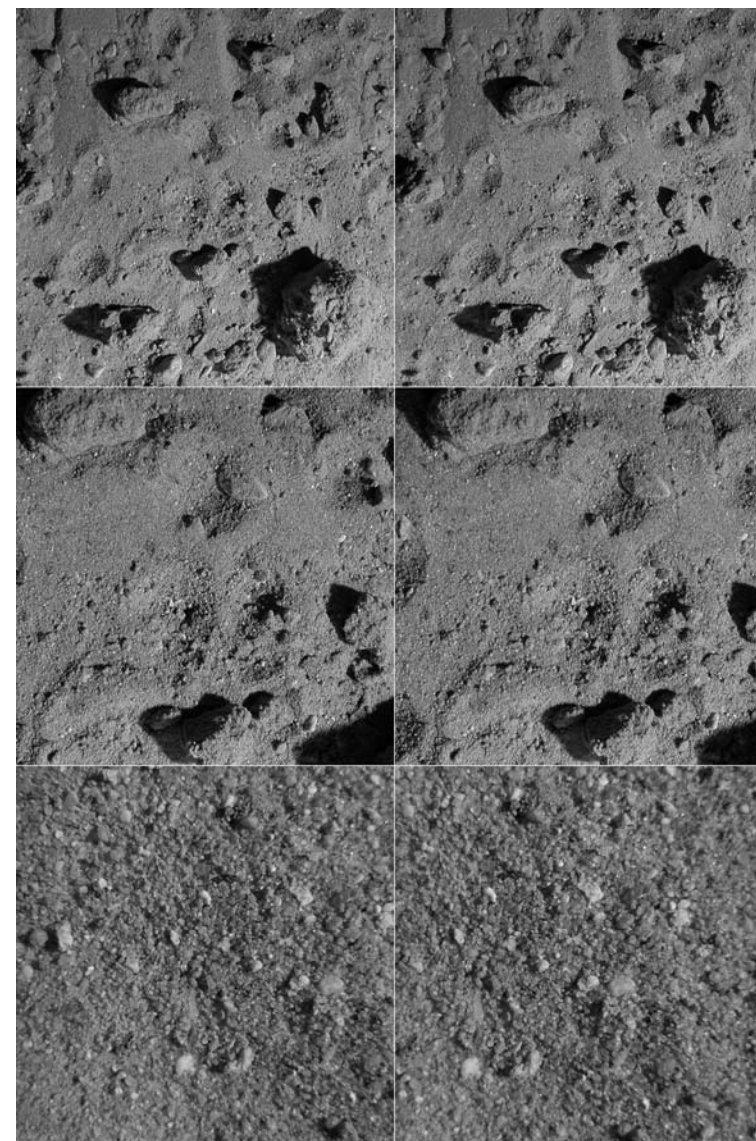


Рис. 3. Стереоизображения, полученные на стенде моделирования с высоты 65 см (верхний ряд), 30 см (средний ряд) и 3 см (нижний ряд)

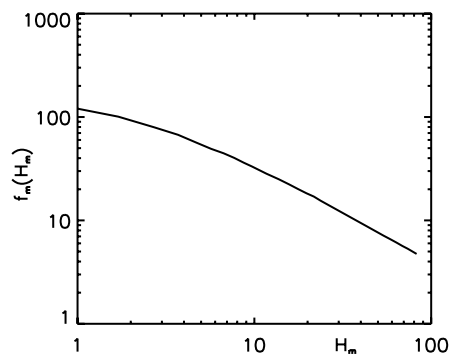


Рис. 4. Калибровочная функция $f_m(H_m)$

При реальной съемке камерами ТСНН цифровой параллакс равен

$$\Delta n = \frac{BF}{Hd}, \quad (3)$$

где $B = 2$ м — стереобаза съемки; F — фокусное расстояние камер ТСНН; $d = 7,4$ мкм — размер элемента ПЗС-матриц камер ТСНН.

Поскольку при прямом вводе модельных изображений в процессорную память камер ТСНН значение цифрового параллакса сохраняется, из соотношений (2) и (3) получаем эквивалентную высоту съемки камерами ТСНН, соответствующую измеряемой высоте H_m и стереобазе B_m съемки на СМ:

$$H = \frac{BFk_m}{B_m f_m(H_m) d}. \quad (4)$$

При изменении высоты съемки на СМ от 1 до 83 см и при выборе стереобазы B_m , равной 15 мм, реализуется приоритетный для УТК интервал эквивалентных высот от 4 км до 300 м (рис. 5). Для моделирования больших эквивалентных высот для УТК необходимо уменьшить стереобазу B_m до 3 мм. В случае ШТК для получения приоритетного интервала эквивалентных высот от 300 до 10 м необходимо установить $B_m = 10$ мм, а для моделирования больших высот — $B_m = 0,5$ мм.

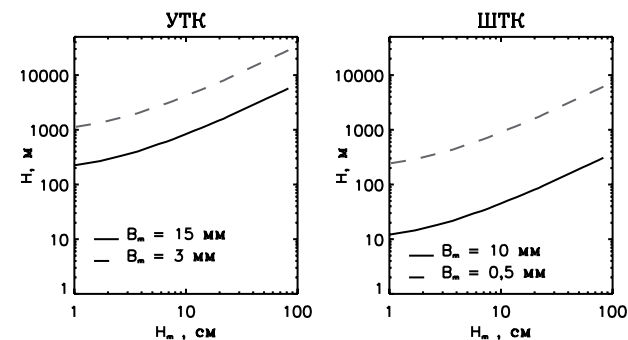


Рис. 5. Зависимость эквивалентной высоты съемки H камерами ТСНН от высоты съемки на стенде H_m при прямом вводе изображений в процессорную память ТСНН

4. Выбор параметров моделирования при использовании изображений на стенде ТСНН

Окончательная отработка ПАО ТСНН в режиме «Посадка» будет происходить на стенде ТСНН. При этом объективы УТК будут заменены на более короткофокусные — с фокусным расстоянием $F = 50$ мм. Тестовые изображения будут выводиться на экраны имитаторов поверхности Фобоса (ИПФ) и через коллимационные объективы сниматься камерами ТСНН (рис. 6).

На экранах ИПФ будет реализован тот же цифровой стереопараллакс, что и при съемке на СМ. При этом цифровой параллакс, регистрируемый камерами ТСНН, будет равен

$$\Delta n = \frac{Fd_{im}}{F_c d} \Delta n_m, \quad (5)$$

где F_c — фокусное расстояние коллимационного объектива (100 мм для ШТК и 200 мм для УТК), $d_{im} = 96$ мкм — размер пиксела на экранах ИПФ.

Используя соотношения (2), (3) и (5), получим эквивалентную высоту съемки камерами ТСНН:

$$H = \frac{BF_c k_m}{B_m f_m(H_m) d_{im}}. \quad (6)$$

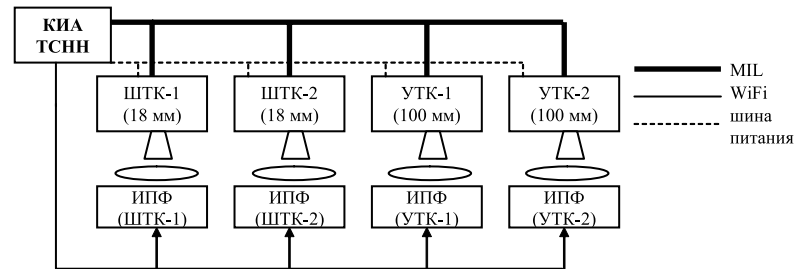


Рис. 6. Структура стенда ТСНН

При изменении высоты съемки на СМ от 1 до 83 см приоритетные интервалы эквивалентных высот для УТК и ШТК реализуются при выборе стереобазы B_m , равной 0,5 и 5 мм соответственно, а для моделирования больших эквивалентных высот — при стереобазе B_m , равной 0,1 и 0,25 мм соответственно (рис. 7).

Таким образом, разработанный стенд моделирования позволяет решать задачу получения детальных стереоизображений шероховатых поверхностей для отработки программно-алгоритмического обеспечения ТСНН в режиме «Посадка» в требуемом интервале эквивалентных высот от 30 км до 10 м.

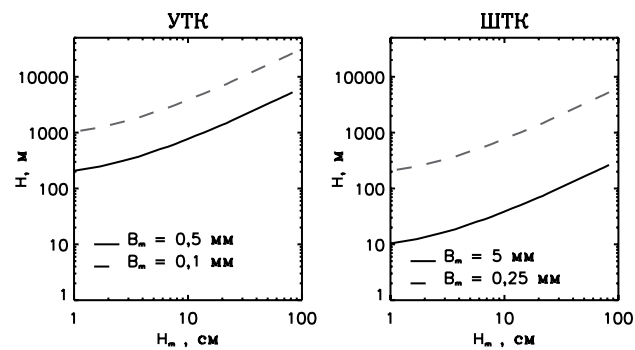


Рис. 7. Зависимость эквивалентной высоты съемки H камерами ТСНН от высоты съемки H_m на стенде моделирования при использовании изображений на стенде ТСНН

Литература

1. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б. Задачи, решаемые телевизионной системой навигации и наблюдения в проекте «Фобос-Грунт». (Статья в настоящем сборнике, с. 239.)
2. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б. Телевизионные средства навигации и наблюдения проекта «Фобос-Грунт» // Космич. приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космич. технологий. Приборы для космич. исслед. Земли и планет: Сб. тр. по результатам выездного семинара / Под ред. Р.Р. Назирова. Россия, Таруса, 7–9 июня 2006. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 226–231.
3. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Гришин В.А., Гордеев Р.В. Бортовое программно-алгоритмическое обеспечение информационной поддержки посадки на Фобос. (Статья в настоящем сборнике, с. 294.)